

P. C. M. TRANSMISION POR IMPULSOS CODIFICADOS

Por F. SAEZ VACAS

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

SUMARIO

Idea de principio.

Ventajas del P. C. M.

BREVE DESCRIPCION DE UN EQUIPO P. C. M. TIPO.

Multiplexor.

Convertidor analógico-numérico o codificador. Tipo clásico.

ERRORES EN LAS MEDIDAS

Errores introducidos por los equipos P. C. M.

Errores debidos a las características de la señal de entrada.

Resultados obtenidos.

COMPARACION DE TRES TIPOS DE P. C. M.

Definición del coeficiente β de Sanders.

Sistema P. C. M. no redundante/PSK.

Sistema P. C. M. código ortogonal binario/PSK.

Código biortogonal.

Resultados.

TELEMEDIDAS EN TELSTAR

Consideraciones finales.

Referencias.

Idea de principio.

En la mayor parte de los proyectos avanzados de telemidas espaciales la información se transmite en forma digital. Las diferentes vías o fuentes de información analógicas son muestreadas; las muestras se reparten en el tiempo y después se cuantifican.

Un esquema básico de P. C. M. puede ser el de la figura 1.

Ventajas del P. C. M.

La digitalización, y por tanto el P. C. M., ofrece cierto número de ventajas respecto a la transmisión en analógico:

- 1) Mayor precisión.
- 2) Facilidad para operaciones de codificación.
- 3) Facilidad para efectuar a bordo operaciones digitales (calculador incorporado) y almacenajes, cuya necesidad es manifiesta a medida que crece la complejidad de las misiones espaciales.
- 4) Posibilidad de aumentar el alcance para potencia limitada, aumentando la banda.
- 5) Posibilidad de transmitir las muestras de nivel aleatorio en forma de señales conocidas *a priori* y utilizar así los resultados de la teoría de la detección estadística.

BREVE DESCRIPCIÓN DE UN EQUIPO P. C. M. TIPO

La figura muestra un esquema de principio en el que el mensaje sale cuantificado y codificado en binario.

Vamos a describir ahora brevemente las dos partes más importantes de este equipo.

Multiplexor.

Se aplica en paralelo a un conmutador electrónico o multiplexor un gran número de tensiones analógicas, que representan las diversas medidas, y allí son muestreadas y puestas en la

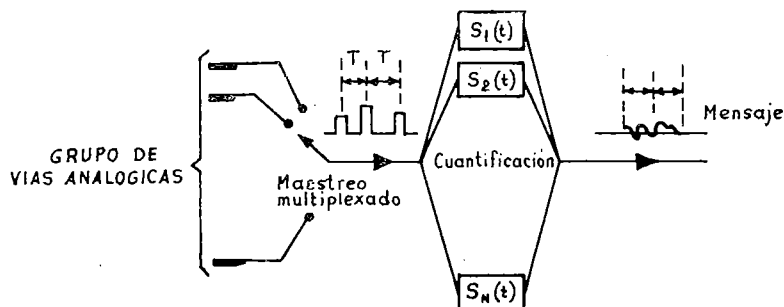


Fig. 1

forma de un tren de impulsos P. A. M. La amplitud de cada impulso representa el valor de la medida. Cada vía se muestra durante un determinado tiempo nada más, pero se mantiene la señal de salida por un bloqueo durante el tiempo necesario para la operación de codificación.

La cadencia de muestreo y el orden de las vías vienen determinados por una matriz de programación, que puede variarse. No funciona ninguna vía durante el tiempo de bloqueo.

La conmutación precisa de señales analógicas (sobre todo a bajo nivel) y la amplificación de las mismas para su codificación presentan ciertas dificultades. Los transistores de conmutación rápida han ayudado bastante a resolver este problema.

Convertidor analógico-numérico o codificador. Tipo clásico.

El codificador es un dispositivo que transforma cada impulso del tren proveniente del multiplexor en una serie de impulsos «todo» o «nada», que representan la medida numérica de la variable. Uno de los más conocidos es el codificador por pesadas sucesivas, en el cual la tensión analógica de entrada se compara sucesivamente a tensiones de precisión que representan los distintos pesos binarios. Cada una de estas comparaciones produce un bit, y el conjunto de las comparaciones efectuadas sobre la misma muestra constituye una palabra.

En la figura 3 se ve la codificación efectuada sobre el impulso de la vía 1, correspondiente a la figura 2. Esto da por resultado el número binario 154, 60 por 100 de la escala total.

La primera comparación se hace con una referencia igual a 50 por 100 de la escala total. Un circuito de comparación detecta el signo de la tensión error. Si la señal es superior a la de referencia, se transmite un impulso «uno» o «sí» y se mantiene la referencia 50 por 100. Así sucesivamente.

ERRORES EN LAS MEDIDAS

Los errores que afectan a la precisión de las medidas se clasifican en dos categorías. La primera corresponde al equipo en sí por su concepción y por la acción de las condiciones de ambiente. La segunda categoría de error comprende a aquellas que dependen de las características de la señal de entrada.

Errores introducidos por los equipos P. C. M.

— Errores sistemáticos: Faltas de linealidad por variación de la ganancia de amplificador en

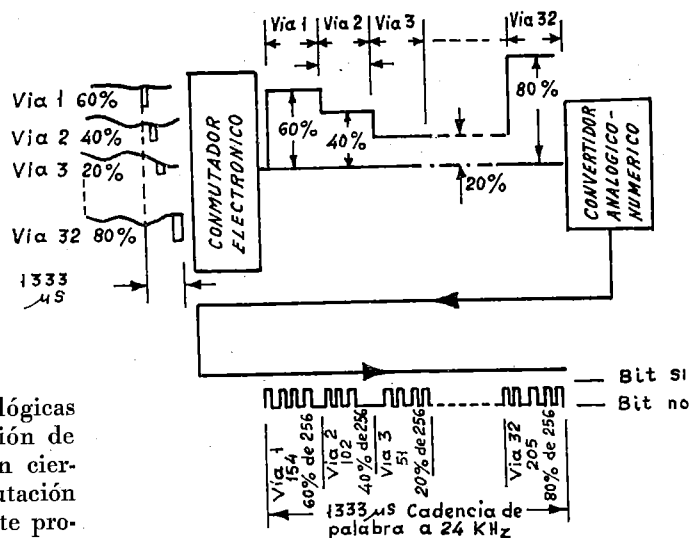


Fig. 2.—Principio de la telemetría P. C. M.

función de la frecuencia, decalaje de cero, variación de ganancia por efecto de la temperatura, de vibraciones...

— Ruido: Viene definido por su valor cuadrático medio y por su espectro. Se representa en tanto por ciento de la escala total en varios puntos de su espectro. Casi siempre es su distribución gaussiana y basta medir la separación media.

— Error de cuantificación: Se debe a la resolución no infinita del codificador. Para un

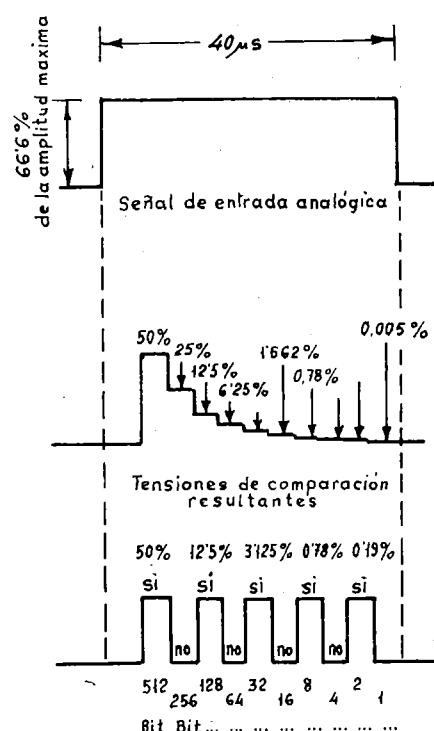


Fig. 3.—Señal de salida codificada.

convertidor ideal el valor máximo de este error es $\pm \frac{1}{2} Q$, siendo Q el intervalo de cuantificación.

— Intermodulación: Este error es debido a la reacción de otras vías sobre la vía estudiada. La medida de la intermodulación de señales alternativas es importante en un sistema P. C. M.

— Error debido al potencial común: Vista la longitud de los cables de conexión al equipo de medida, tensiones mucho más importantes que la señal pueden inducirse. Estas tensiones que aparecen como un potencial común sobre las dos líneas deben ser eliminadas por el equipo P. C. M. Para ello se hace la entrada sobre un conmutador diferencial a dos vías, lo que ya

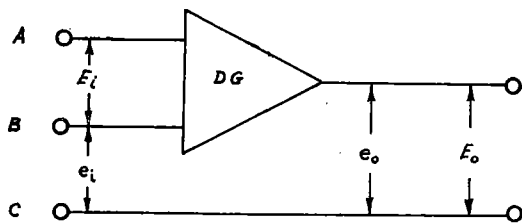


Fig. 4.—Rechazo del potencial común.

permite reducir el efecto del potencial común.

El rechazo del potencial común en el equipo se define como sigue:

$$\text{Relación de rechazo} = \frac{\text{Ganancia diferencial}}{\text{Ganancia en modo común}}$$

$$\text{Ganancia diferencial} = \frac{E_o}{E_i}$$

Cortocircuitados A y B, se aplica el potencial común máximo entre B y C.

$$\text{Ganancia en modo común} = \frac{e_o}{e_i}$$

$$\text{Error máximo debido al potencial común} = \frac{e_o}{E_o} \times 100$$

— Error debido a la impedancia de la fuente: Este error es común a cualquier equipo electrónico.

— Error debido a la banda de paso.

Este error aparece como un filtrado a la entrada. La banda pasante ha de venir especificada en tanto por ciento sobre la banda total, desde continua hasta una frecuencia determinada por la cadencia máxima de muestreo sobre cada vía.

Errores debidos a las características de la señal de entrada.

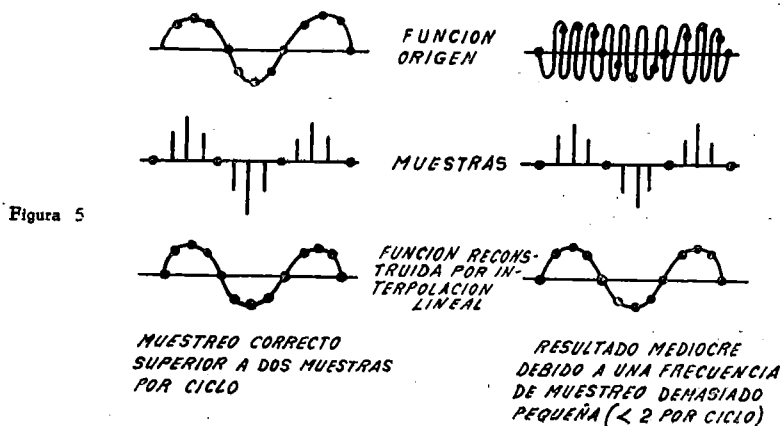
Uno de los errores más importantes debidos a la naturaleza de las señales de entrada proviene de una mala comprensión del teorema de muestreo de Shannon, que dice: « $2F$ muestras por segundo bastarán para representar y reconstituir perfectamente una función de tiempo, si esta función no contiene más que componentes de frecuencia inferior o igual a F ». Ningún fenómeno físico aparece bajo esta forma, y ningún filtro permitirá obtener un resultado tan perfecto.

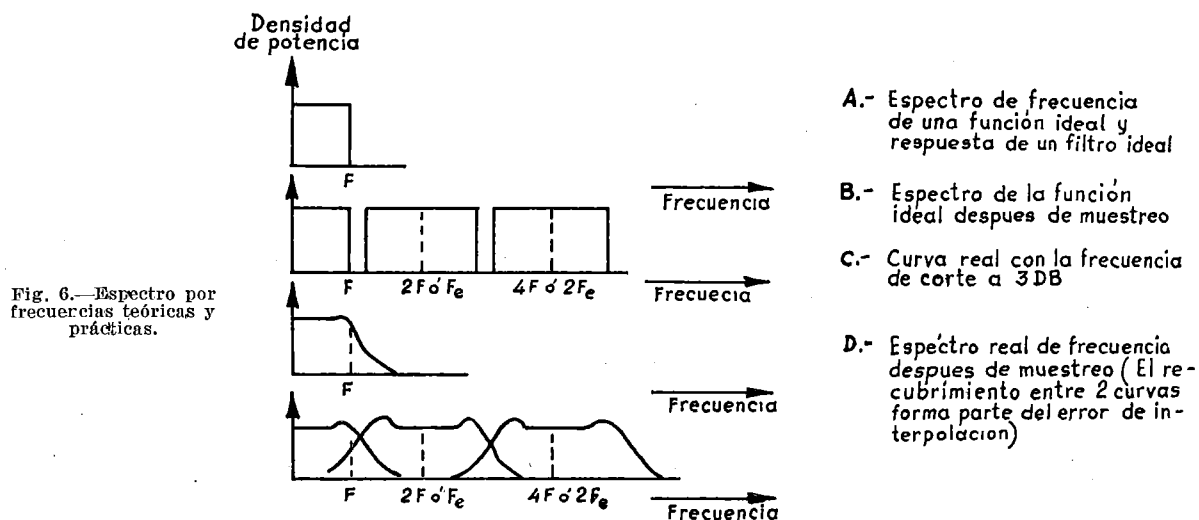
El problema está en poder reconstituir a partir de muestras una señal continua que se presente a la entrada del equipo. La información entre los instantes de muestreo se perderá, a menos que se escoja una cadencia de muestreo tal que permita determinar lo que ocurre entre dos muestras.

Se sabe que si la porción de espectro por encima de F es pequeña, el teorema es prácticamente aplicable. Se compensa este error aumentando la cadencia de muestreo. Se utiliza a menudo una forma aproximada de este teorema que dice que es preciso muestrear a cinco veces la frecuencia de la componente interesante más alta. La cadencia de muestreo puede ser entre tres y treinta muestras por ciclo.

En la figura 5 se ve un ejemplo de buena y mala utilización del teorema de Shannon.

La interpolación consiste en reconstituir la función a partir de las muestras. El error de





interpolación es la diferencia entre la función reconstituida y la señal original. Hay interpolación lineal, interpolación escalonada, interpolación por filtro y por calculador.

Por su naturaleza el error de interpolación es definido por su valor cuadrático medio. Si se estudia el problema por los espectros de frecuencia (fig. 6), la curva A representa una función conforme a la hipótesis del teorema de Shannon. La curva B representa el espectro de frecuencia después del muestreo. Aparecen imágenes de la función inicial en todos los múltiplos de la frecuencia de muestreo. Puesto que no hay recubrimiento entre el espectro inicial y el imagen, puede evitarse el error de interpolación.

— Error de comisión: En la práctica, curva C, se ve que tras el muestreo hay recubrimiento y no se puede hacer muestreo sin error a $2F$. Solución: muestrear a frecuencia superior o colocar un filtro de entrada.

— Error de omisión: En cierto modo es resultado del anterior, ya que el temor a producir

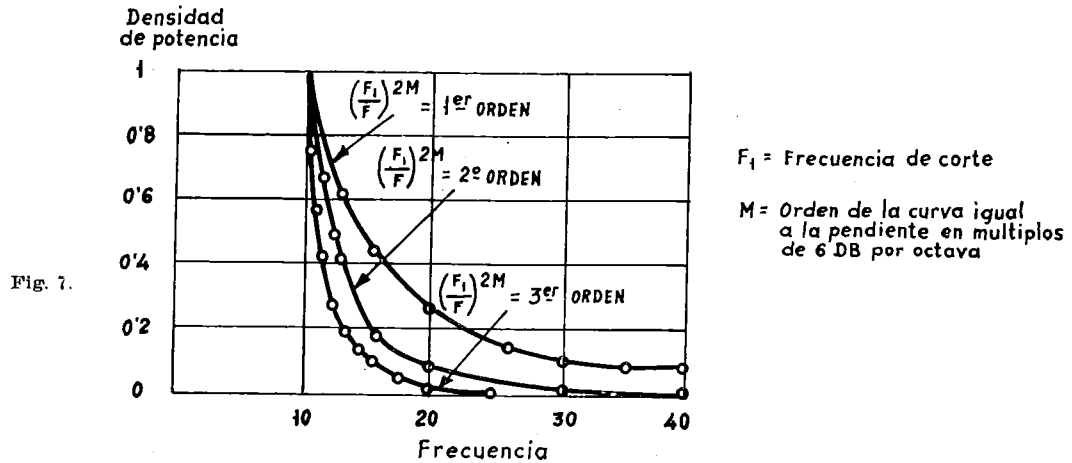
error por comisión hace colocar a la entrada filtros que alteran la información, tanto en amplitud como en fase. Entonces una parte de la información es omitida por el filtro, de donde su nombre.

La suma de los errores de omisión y comisión constituyen el error de interpolación, que es, en definitiva, el que hace difícil la utilización del teorema de Shannon.

Resultados obtenidos.

Se han tratado por calculador funciones matemáticas de distinto orden (fig. 7), de las cuales la de orden infinito es la de Shannon, para obtener una relación entre la cadencia de muestreo y la precisión esperada; en efecto, solamente cuando se conocen la información estudiada y la precisión requerida se debe fijar la cadencia de muestreo. En la tabla que se da a continuación se ha escogido como variable la relación entre la frecuencia de muestreo y la frecuencia

METODO DE INTERPOLACION	M=1	M=2	M=3	M=4	M=5	M=∞
Optimo de Weiner.....	640	11	5,1	3,8	2,6	2,0
Butterworth n=4.....	—	16	8,3	5,5	5,5	5,5
Butterworth n=3.....	—	18	9,2	6,7	6,7	6,7
Butterworth n=2.....	$1,2 \cdot 10^3$	29	17	11	11	11
Filtro RC n=1.....	$1,2 \cdot 10^4$	220	130	91	91	91
Interpolación sobre 1 punto (escalón).....	910	37	26	22	21	21
Interpolación sobre 2 puntos (lineal).....	640	13	8,3	5,9	5,9	5,9
Interpolación sobre 3 puntos.....	640	12	6,2	5,2	—	4,0
Interpolación 4 puntos.....	640	12	5,7	4,3	—	3,3



de corte de la información, es decir, el número de muestras por ciclo de la frecuencia de corte. El cuadro da los valores de esta variable, para diversos órdenes de funciones, diversos métodos de interpolación y para una precisión fija. Los cinco primeros métodos de interpolación corresponden a diferentes tipos de filtros.

De estos resultados, obtenidos por Radiation Incorporated, se ve que el número de muestras necesario aumenta muy rápidamente a medida que crece el orden de las funciones, o sea a medida que nos alejamos de la condición de Shannon. Hay otras tablas, para otras precisiones, y de ellas se aprecia claramente cómo hay que aumentar considerablemente la cadencia de muestreo si se quiere mejorar la precisión.

COMPARACIÓN DE TRES TIPOS DE P. C. M.

Haciendo referencia a la figura 1, sea N el número de niveles de cuantificación, que depende de la precisión deseada y de la amplitud. Cada nivel está representado por una señal video $s_i(t)$, de duración T , siendo T el tiempo permitido para la transmisión de una muestra, lo cual depende del número de vías y de la anchura del espectro. Después de la cuantificación el mensaje es una serie de señales o palabras $s_i(t)$. Es-

tas palabras, reales, son equiprobables, puesto que la amplitud de las muestras es de densidad de probabilidad uniforme. Cada palabra contiene la información máxima que puede tener, o sea $n = \lg_2 N$ bit.

Hay tres sistemas, entre otros, cuyos resultados se pueden comparar:

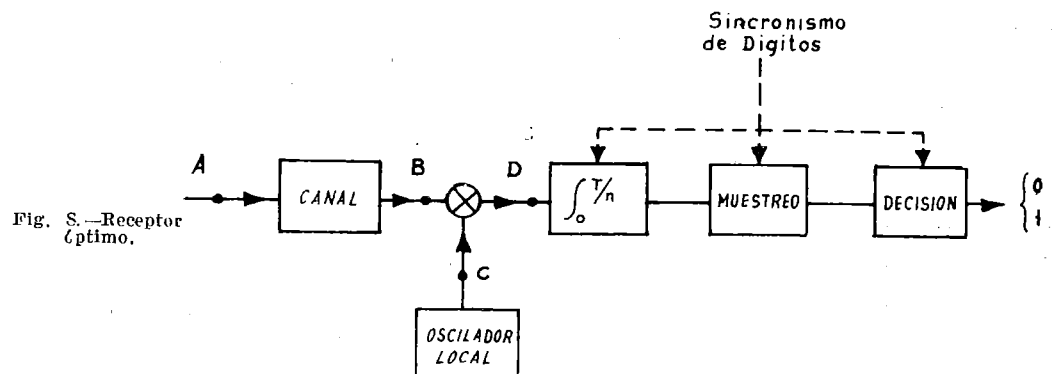
- Son: 1) Sistema PCM no redundante/PSK.
- 2) Sistema Código ortogonal binario/PSK.
- 3) Sistema Código biortogonal binario/PSK.

Todos ellos utilizan una primera modulación binaria. Las palabras se componen con un alfabeto de dos letras o dígitos 0 y 1. El dígito 0 está representado por la señal $\bar{s}_0(t)$, el 1 por $\bar{s}_1(t)$. Se demuestra teóricamente que, en presencia de ruido gaussiano blanco, la protección contra el ruido es máxima si

$$\bar{s}_0(t) = -\bar{s}_1(t)$$

La segunda modulación es también común a los tres sistemas: es una modulación bifase PSK (Phase Shift Keyed). El demodulado será óptimo, coherente, síncrono y por correlación, en general. El ruido por canal, gaussiano, de densidad espectral e^2 uniforme.

Lo que difiere de un sistema a otro es la redundancia.



Definición del coeficiente β de Sanders.

Permite comparar cuantitativamente sistemas de comunicación con canal perturbado con ruido gaussiano ϵ^2 . Este es el caso de las medidas espaciales.

$$\beta = \frac{\text{Energía mínima recibida por bit de información transmitido}}{\text{Densidad espectral del ruido}}$$

El numerador depende del canal, de la modulación utilizada y de la forma de detección. Si se supone que el mensaje llega a los correlatores sin deformación,

$$\beta = \frac{E}{2\epsilon^2} \cdot \frac{1}{R'}$$

siendo E la energía media recibida por palabra (por dígito), y R' porcentaje de transmisión de información por palabra (por dígito).

Sistema P. C. M. no redundante/PSK.

Cada palabra $s_i(t)$ viene representada por n dígitos binarios equiprobables. Cada dígito contiene un bit de información.

La señal recibida se multiplica por la señal del oscilador local, que proporciona la referencia de fase. El producto se integra durante la duración de un dígito. Después se muestrea en sincronismo con el ritmo binario. Un órgano de decisión decide 0 ó 1.

Sistema P. C. M. código ortogonal binario/PSK.

— Definición de un conjunto de señales ortogonales: Las palabras son representadas durante el período $(0, T)$ por funciones $s_i(t)$, que verifican la propiedad

$$\int_0^T s_i(t) \cdot s_j(t) \cdot dt = 0$$

En nuestro caso de código ortogonal binario, en que queremos 2^n palabras diferentes, cada palabra viene constituida por una serie de 2^n dígitos 0 y 1. El código es redundante. La cantidad de información por palabra es n bit, en tanto que la cantidad máxima permitida por la repre-

sentación binaria es 2^n . La redundancia del mensaje es:

$$\rho = 1 - \frac{n}{2^n}$$

Receptor:

Se envía la señal video sobre un banco de N correlatores en paralelo. Cada correlator integra durante la duración de una palabra y en sincronismo con esta palabra el producto de la señal video por una señal local $s_i(t)$. Al final del período de integración son muestreadas y las muestras pasan a un órgano de decisión. Este escoge por señal emitida la señal local correspondiente a la muestra de valor algebraico máximo; se demuestra que es la señal más probable.

En presencia de ruido todas las muestras son variables aleatorias gaussianas de valor medio nulo, salvo la que corresponde a la señal recibida, que tiene por media E . Es aquí donde reside la ventaja del código ortogonal, que permite utilizar mejor la detección por correlación.

Código biortogonal.

Las palabras pertenecen a dos subconjuntos 1 y 2, separadamente ortogonales y complementarios: el conjunto 2 contiene las opuestas de las señales de 1.

Las 2^n palabras del código biortogonal están constituidas por un conjunto de 2^{n-1} dígitos binarios 0 ó 1. La redundancia es menor que para el código ortogonal, porque la cantidad máxima de información por palabra es 2^{n-1} bit, de donde

$$\rho = 1 - \frac{n}{2^{n-1}}$$

Receptor:

— Se envía la señal video sobre un banco de $N/2$ correlatores debido a que, signo aparte, no hay más que $N/2$ palabras diferentes. Las palabras engendradas localmente pertenecen todas al mismo grupo ortogonal 1 ó 2. Por contra, el órgano de decisión debe tener en consideración el signo de las muestras. En efecto, en ausencias del ruido, todas son nulas salvo una, que puede ser positiva o negativa, según que la pa-

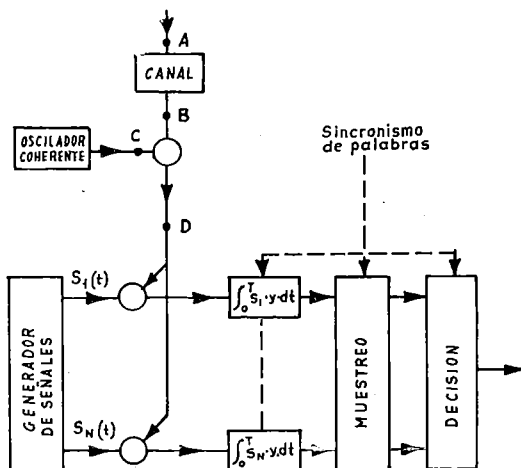


Fig. 9.

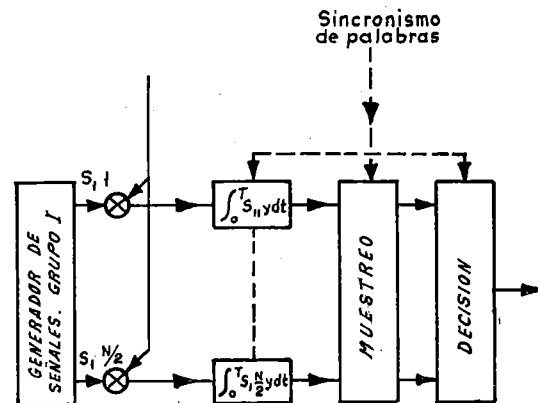


Fig. 10.

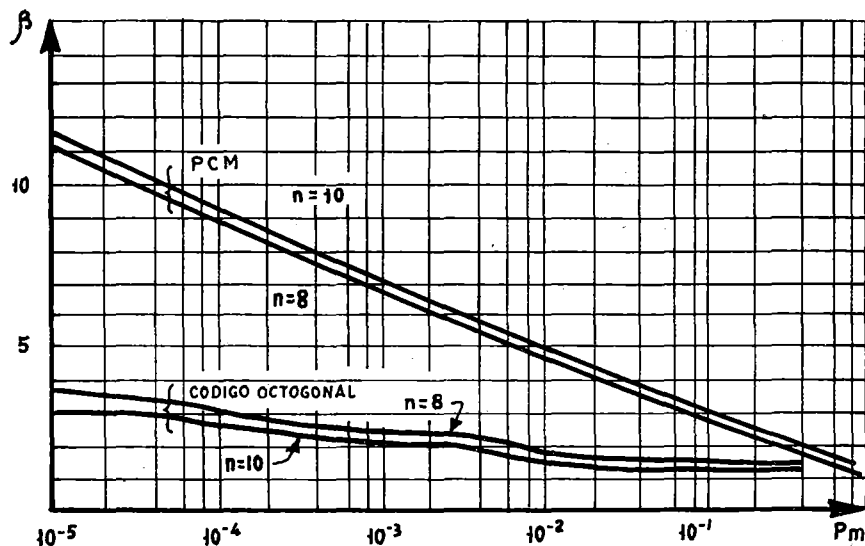


Fig. 11.

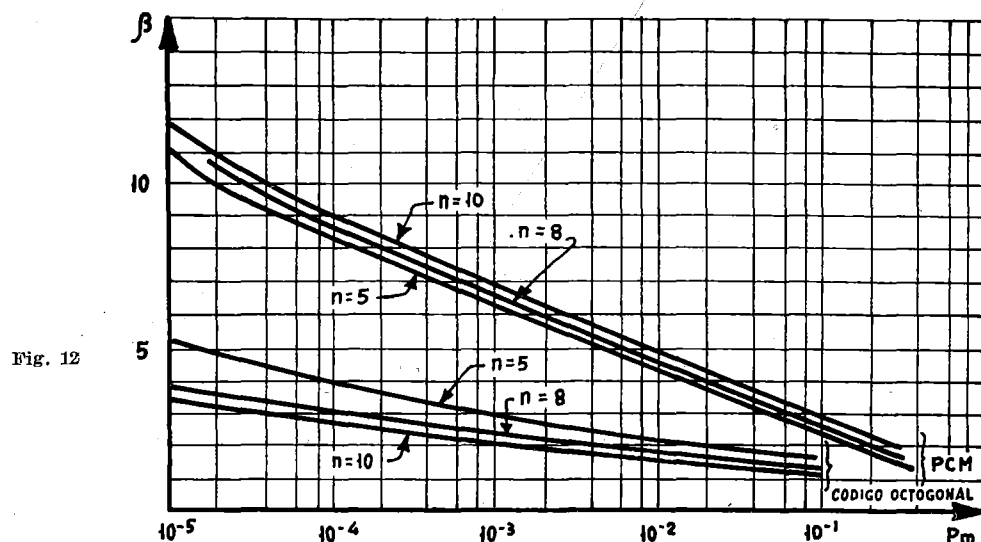


Fig. 12

labra emitida pertenezca o no al mismo grupo que las palabras engendradas localmente. En presencia de ruido se demuestra que la palabra más probable corresponde a la muestra de valor absoluto máximo; si esta muestra es positiva, pertenece al mismo grupo que las palabras engendradas localmente; si negativa, pertenece al otro grupo.

No hemos hablado hasta ahora de P_m ; P_m es la probabilidad de identificar erróneamente una palabra. En cualquier caso de P. C. M. se estudia esta probabilidad, así como el coeficiente β y las bandas necesarias. Algunos de estos resultados se estudian en las figuras siguientes.

Resultados.

Puede verse por las curvas que, para un valor dado de P_m , es el código biortogonal el que tiene β más débil.

El código ortogonal es muy sensiblemente tan eficaz. La ventaja de los códigos ortogonales es

tanto más marcada cuanto que P_m es más pequeña.

Los resultados suponen que el mensaje video llega a los correladores sin distorsiones. En rigor, haría falta para ello bandas infinitas. En la práctica basta con que las bandas sean suficientemente amplias para que las deformaciones del mensaje sean despreciables.

Es el código biortogonal el que más se aproxima al código ideal de Shannon. A medida que se hace mayor el número de dígitos n , los códigos ortogonales y biortogonales tienen la misma eficacia, porque β_{lim} se hace constante. Se aproximan al código ideal.

La elección de un código depende en la práctica de lo que se quiere hacer. Viene condicionado por el valor máximo de error tolerado hasta un cierto alcance. En todos los casos el código biortogonal es preferible al código ortogonal, puesto que exige la mitad de banda y la mitad de correladores.

Las curvas de las figuras 11 y 12 permiten calcular la relación señal/ruido a la entrada del receptor en función del valor de P_m deseado.

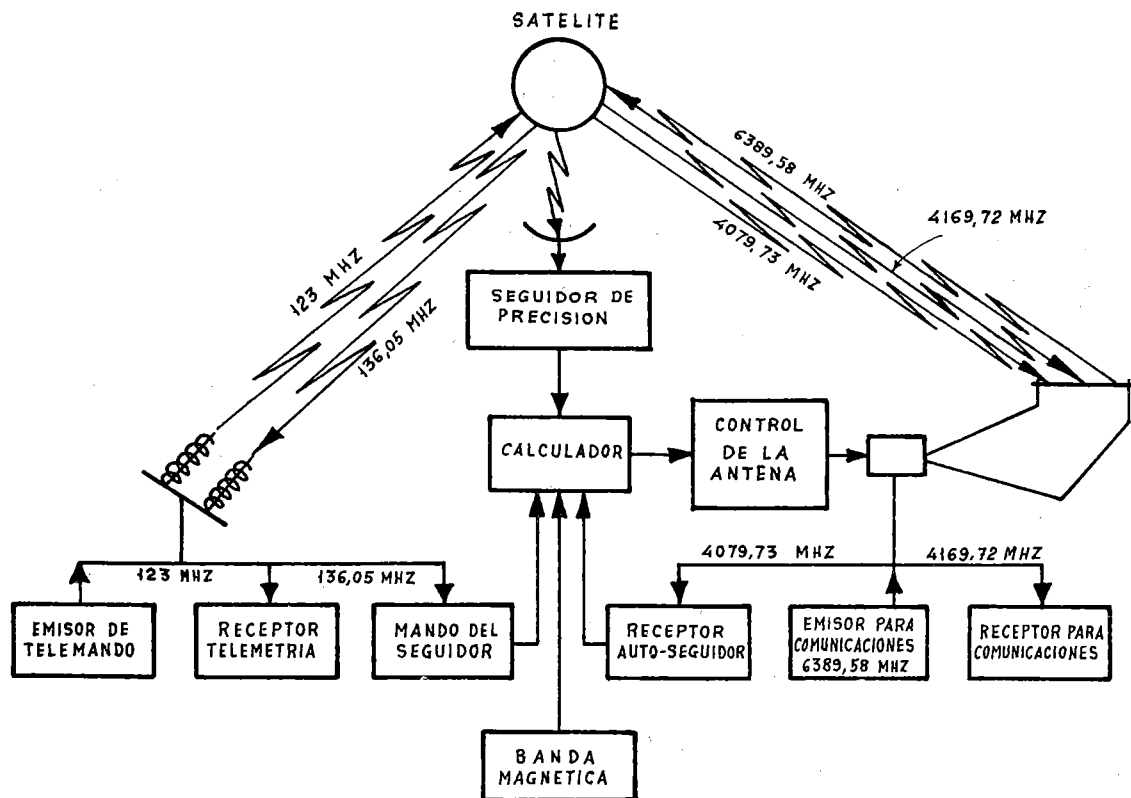


Fig. 13.

TELEMEDIDAS EN TELSTAR

La experiencia Telstar estaba destinada a estudiar el conjunto de problemas relativos a las telecomunicaciones por satélites. Vamos a hacer abstracción de cuáles eran estos problemas y de todo lo referente a ellos, para fijarnos única y exclusivamente en la parte correspondiente a telemedidas y telemando.

En la figura 13 se ve que: La antena de persecución y telemando efectúa primero la localización del satélite, buscando la baliza a 136 MHz. El emisor de telemando que funciona sobre 123 MHz pone en marcha la telemetrida P. C. M. del satélite, lo que permite verificar el estado de salud del satélite a bordo.

La finalidad de la telemetrida de a bordo es la de poner en forma numérica, para su transmisión, las tensiones analógicas provenientes de los captadores o sensores, así como los resultados del recuento de partículas.

Características del sistema:

Entradas	Niveles
80 analógicos alto nivel.....	0-5 v.
10 variables solares	0-0,5 v.
14 analógicos a bajo nivel.....	0-0,1 v.
14 numéricos.....	
2 sincros de palabras	

Precisión

Alto nivel.....	1%
Bajo nivel	2%
Codificador de muestreo	2 Hz
Cadencia numérica interna	175 kHz
Cadencia numérica de salida.....	16 Hz
Factor de forma	0,034%, 172/s/palabra
Frecuencias de muestreo de las variables sonoras	10 kHz
Longitud del ciclo	120 palabras
Cadencia del ciclo.....	1 por minuto
Potencia.....	350 mW.
Peso	3,6 Kg _a
Volumen	4,2 dm

La telemetrida de Telstar es un sistema P. C. M./FM/AM que permite 118 medidas al minuto. La información es transmitida por palabras de 8 bits, de los cuales uno es de sincronización. Esta señal modula en frecuencias a una subportadora de 3 kHz que, a su vez, modula en amplitud la portadora de 136 MHz de la baliza. La potencia de emisión es de 0,2 W; la emisión es continua, pero no modulada más que cuando la telemetrida funciona.

La cadencia de funcionamiento es de 16 bits, o sea dos palabras por segundo. Su capacidad es de 118 vías de medida y dos vías de sincronización.

Las vías de medida comprenden 77 vías de alto nivel, 14 de nivel medio, 10 vías bajo nivel y tres vías de ajuste. Hay además siete vías numéricas, cada una de dos palabras de 8 bits, para los detectores de partículas.

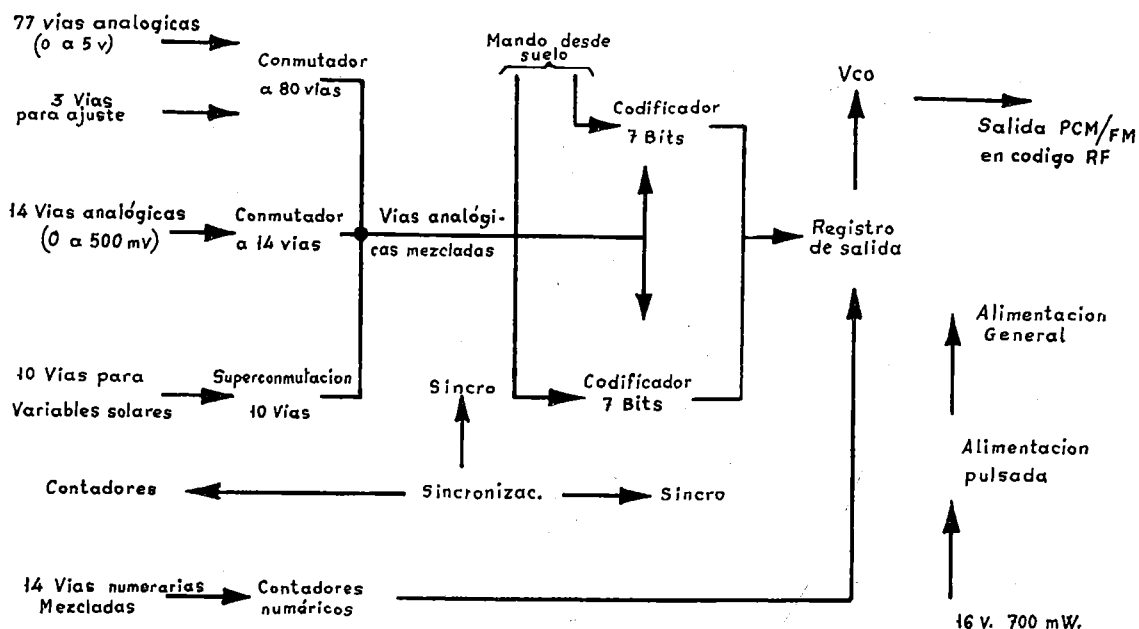


Fig. 14.

La figura 14 muestra el bloque diagrama de conjunto. Comprende seis funciones principales: el multiplexor, los codificadores, el programador, el detector de posición del Sol y un conjunto lógico para el mando y la lectura de los registros de las entradas numéricas.

Consideraciones finales.

Tenía la intención de presentar aquí también las características del equipo P. C. M. a bordo de la cápsula Apollo, pero este trabajo se alargaría demasiado. Hubiera sido posible entonces la comparación de las características, distintas en cada caso, según las necesidades.

En efecto, la telemetría ha cerrado el bucle desde su aplicación a los aviones hasta su aplicación a las cápsulas habitadas, pasando por los cohetes y los satélites. Así, por ejemplo, en un cohete la velocidad es grande y el vuelo muy corto; por tanto, la banda de paso en las medi-

das ha de ser mucho más grande que en el caso de aviones. Para los satélites la necesidad es diferente, ya que, aunque la velocidad es grande, las condiciones cambian lentamente y el tiempo de funcionamiento es corto. Hay necesidad de numerosas medidas, pero a una cadencia muy pequeña.

Para las cápsulas habitadas, caso del Apollo, el problema es triple. Corresponde al de un cohete durante el lanzamiento y el de un avión y un satélite durante el vuelo. No se pueden tener tres equipos. Pues bien, entonces la telemetría de nuestro equipo deberá asegurar las tres funciones, es decir: suministrar las indicaciones al piloto para el control del vuelo; funcionar a gran cadencia durante el lanzamiento y la reentrada en la atmósfera, y, por último, a débil cadencia durante el vuelo orbital. Esto se debe, como ya se ha dicho anteriormente, a que, según la naturaleza de la información y la precisión requerida, la cadencia de muestreo es distinta.

NOTA: En las figuras 11 y 12 debe leerse código «Ortogonal» no «octogonal».

REFERENCIAS

- (1) "Systemes digitaux pour télémétries spatiales".—J. DUPRAZ.—*L'Onde Electrique*; marzo 1963. Págs. 298-310.
- (2) «L'évolution des télémétries P. C. M.»—L. W. GARDENHIRE.—*L'Onde Electrique*; noviembre 1963. Páginas 1072-1085.
- (3) "Le satellite de télécommunication Telstar".—GARDENHIRE.—*L'Onde Electrique*; noviembre 1963. Págs. 1101-1109.
- (4) "Télémétrie P. C. M. de la capsule Apollo".—GARDENHIRE.—*L'Onde Electrique*; noviembre 1963. Páginas 1093-1100.
- (5) "Utilisation des systemes P. C. M.".—GARDENHIRE.—*L'Onde Electrique*; noviembre 1963. Págs. 1101-1109.